

大电流金属粉芯焊丝在工程机械制造领域的应用研究

李德明, 高德坊, 张伟刚, 樊熠超, 丁志远, 王彩凤

山推工程机械股份有限公司 山东济宁 272000

摘要: 针对工程机械某型产品长方盒类构件在制造中存在工件母材受热面积大、焊接变形大, 以及焊后修磨量大、补焊部位多等问题, 开展大电流金属粉芯焊丝焊接工艺研究并进行试验。从焊接性能、成形质量、焊接参数, 以及焊接修磨辅料成本等方面, 与目前实心焊丝进行对比分析, 从综合应用因素评价, 找到更适合长方盒类构件长直焊缝的焊接工艺方法。

关键词: 工程机械; 金属粉芯; 高熔敷率; 工艺研究

Application research of high current metal powder core welding wire in the field of engineering machinery manufacturing

LI Deming, GAO Defang, ZHANG Weigang, FANG Yichao, DING Zhiyuan, WANG Caifeng

Shantui Construction Machinery Co., Ltd., Jining 272000, Shandong, China

Abstract: In response to the problems of large heating area of the workpiece base material, large welding deformation, large post welding grinding amount, and multiple welding repair parts in the manufacturing of rectangular box components of a certain type of engineering machinery product, research and testing of high current metal powder core welding wire technology were carried out. By comparing and analyzing the welding performance quality, spatter, wire feeding speed and process parameters, welding and grinding material costs, and other aspects with the current solid core welding wire, and evaluating the comprehensive application factors, a more suitable welding process method for long straight welds of rectangular box components is found.

Keywords: construction machinery; metal powder core; high deposition efficiency; process research

1 序言

目前, 工程机械某型产品长方盒类构件均采取截面箱形结构, 该箱形结构与普通箱形结构不同, 采取凸字形钢结构取消垫板, 焊缝一律采用对接接头, 结构如图1所示。由图1可知, 其断面形状似方

盒故称为长方盒类构件^[1], 由上下凸字形钢和左右侧板组成, 具有结构简单、组焊方便的优点, 能起到在不加大腹板厚度的前提下提高刚度, 从而控制设备自身重量。

第一作者: 李德明, 正高级工程师, 研究生, 主要研究方向为工程机械制造技术, E-mail: lityjidian@163.com。

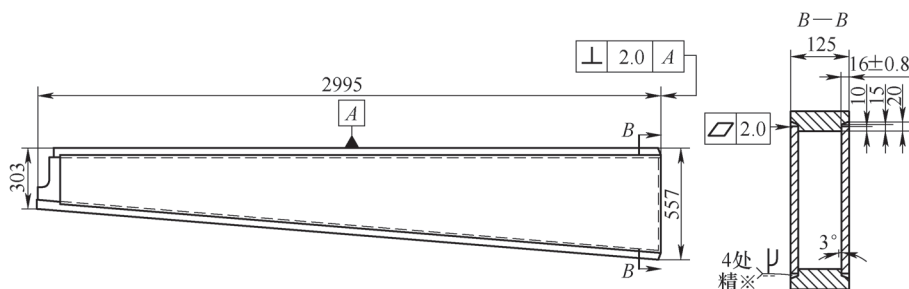


图1 某长方盒类构件结构示意图

焊接采用ER50-6、 $\phi 1.6\text{mm}$ 实心焊丝，焊接电流为420~440A，属大电流作业范围，由于瞬间热输入大，工件母材受热面积大，焊接变形大，同时焊后修磨量大、补焊部位多，所以方盒焊后变形较大，弯曲和扭曲均需进行矫正。功率 $\leq 220\text{hp}$ （ $1\text{hp} = 0.7457\text{kW}$ ）的机型采用通过式立式矫形机进行矫正，功率 $\geq 320\text{hp}$ 的机型采用大吨位龙门式压力机进行矫正。由于扭曲矫正难度较大，因此当矫正后无法满足技术要求时，通常采取返修铣面，从而保证垂直度要求。

为解决上述问题并进一步提升焊接熔敷率，进行了深入的市场调研，发现金属粉芯类焊丝与药芯焊丝制造工艺基本一致，在拉拔后的薄钢带内填充粉剂，粉剂主要成分为铁合金粉，同时含有较少的非金属矿物，其成分可以抑制焊接飞溅，较实心焊丝具备承载更大电流密度和更高熔化系数的优点，如图2所示。金属粉芯焊丝作为新型材料，逐渐在某些领域呈现出代替实心焊丝的趋势。

进一步对该类焊丝的国内外应用现状进行文献查阅^[2-5]，发现金属粉芯焊丝专利最早出现在1957年的英国，但是由于制造工艺不足、应用成本较高，因此不具备大范围应用基础。随后1986年，日本相

关学者开始研发金属粉芯焊丝并进行了初步应用。美国也很重视金属粉芯的开发和应用，霍伯特和林肯电气公司就开发出了多种系列的金属粉芯焊丝。霍伯特公司拥有Tri-Mark、Hobart、Corex三大系列品牌金属粉芯焊丝，就Tri-Mark系列而言，Metalloy的熔敷效率可达96%。此外，韩国现代焊接有限公司早年也开发了Super-corex 70NS金属粉芯焊丝，可应用于造船和桥梁建设等行业的自动焊接或机器人作业中，而且取得了很好的效果。伊萨公司也在金属粉芯型药芯焊丝领域有诸多产品且经过了市场检验。目前，国内市场林肯、通用、京雷、铁锚等相关企业在金属粉芯焊丝的开发方面已取得了重要进展，并在某些领域场景得到应用^[6]。

2 试验材料与方法

为研究大电流金属粉芯焊丝技术，利用金属粉吸收热量，其成分抑制飞溅，进行试验验证，并在焊接性能、成形质量、焊接参数，以及焊接修磨辅料成本等方面与目前实心焊丝进行全面验证对比分析，从综合应用因素评价，开展本次试验。

2.1 熔敷金属性能试验方案

依据GB/T 8110—2020《熔化极气体保护电弧

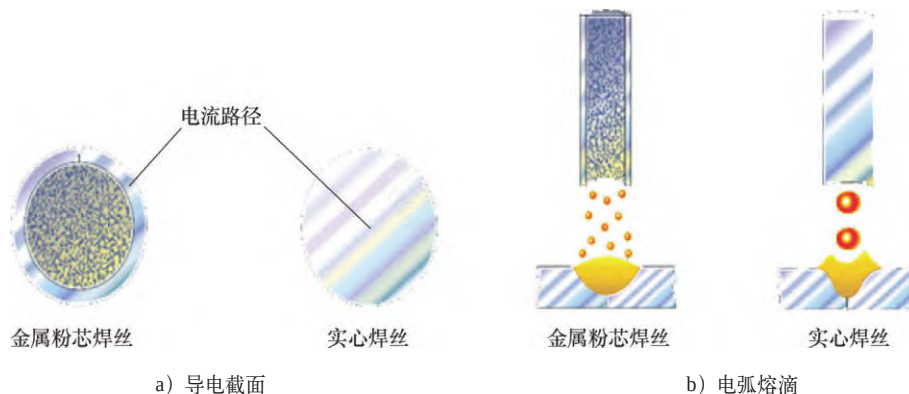


图2 金属粉芯焊丝与实心焊丝熔化特性对比

焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》的规定，采取熔覆金属工艺试板进行焊接试验来验证力学性能。试验材料为林肯MW-70MC、 $\phi 1.2\text{mm}$ 镀铜盘装焊丝，试验设备采用某知名品牌500A多用途数字化焊机。根据GB/T 985.1—2008《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》和产品图样要求，工艺试板材质为Q460C钢，规格为 $260\text{mm} \times 200\text{mm} \times 16\text{mm}$ ，钝边 2mm ，开 60° V形坡口，混合气体为 $80\%\text{Ar} + 20\%\text{CO}_2$ 。焊接方式为对接焊，实施单面焊双面成形工艺，焊接方向平行于轧制方向^[7]。

2.2 焊接参数及现场执行

试板焊接组装间隙为 $2 \sim 3\text{mm}$ ，V形坡口焊接接头反面采取陶瓷衬板，适当采取反变形措施控制焊接变形，并对试板接近接头的区域（两侧 20mm 范围）清除水、锈、油污和其他杂质，防止产生气孔，具体焊接参数见表1。

金属粉芯焊丝焊接试板外观如图3所示。由图3可知，焊缝成形控制稳定，焊缝外观质量均一性好，同时飞溅物较少，对减少过度焊接非常有利，在同样焊接参数下金属粉芯焊丝的焊接烟尘产生量比实心焊丝明显要少，具有减少环境污染的优势。

表1 具体焊接参数

焊丝型号及规格/mm	焊接方法	焊道	焊接电流/A	保护气体流量/(L/min)	焊接速度/(cm/min)	层间温度/ $^\circ\text{C}$	备注
MW-70MC $\phi 1.2$	混合气体保护焊	打底	230 ± 10	25	35	100~150	采取一元化参数设计，电弧电压可微调 $\pm 2\text{V}$
		填充+盖面	310 ± 10	30	40		



图3 金属粉芯焊丝焊接试板外观

按GB/T 985.1—2008要求各制作3组试样进行拉伸、冲击试验，结果如图4所示。同时，对比目前实

心焊丝焊接结果（取平均值），得出如下结论。

1) 所有工艺试验结果均符合或优于GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》的要求。

2) 金属粉芯焊丝在屈服强度、抗拉强度、伸长率和冲击吸收能量方面高于实心焊丝，仅收缩率略低。尤其是 -30°C 冲击吸收能量大幅提升53%，综合力学性能明显优于实心焊丝。

采用两种焊丝所得的金相组织如图5所示。由图5可知，金属粉芯焊丝焊接可获得晶界型铁素体、针状铁素体，组织较细，力学性能较好；实心焊丝焊接虽然也具有晶界型铁素体，但含二次相铁素体组

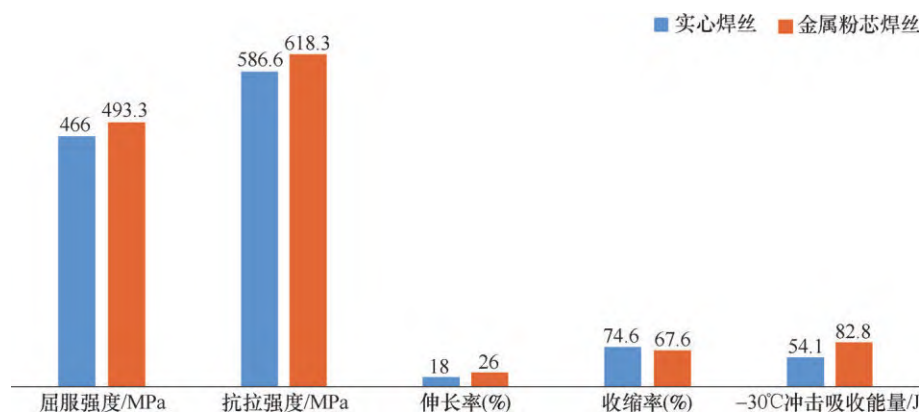
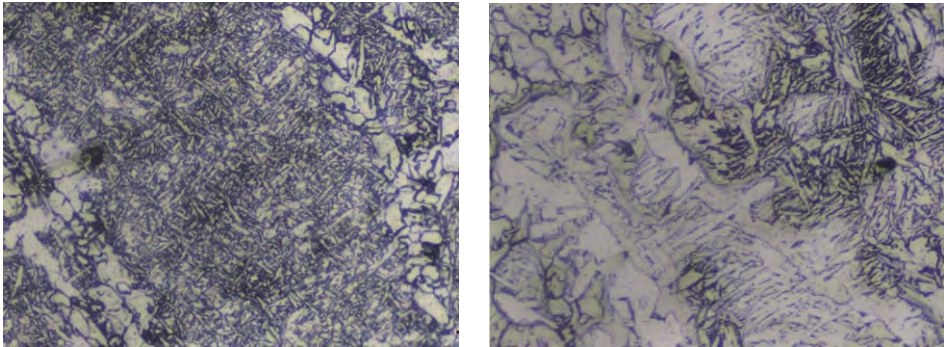


图4 力学性能检测结果



a) 金属粉芯焊丝 b) 实心焊丝

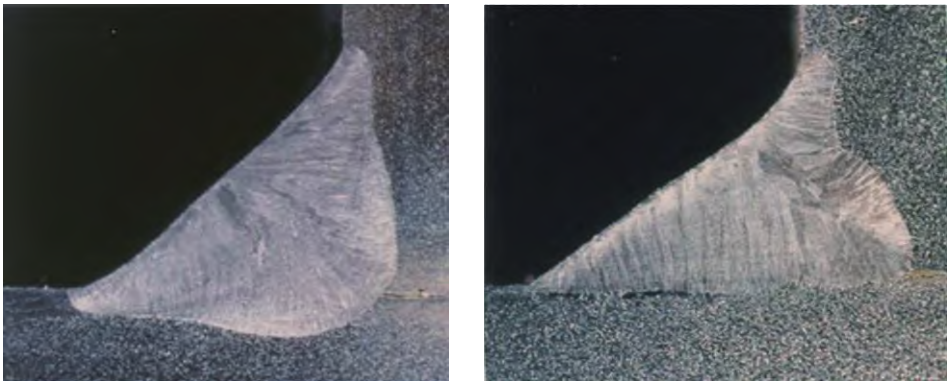
图5 焊缝区域金相组织对比 (500×)

织较粗，导致力学性能较差。

为了验证更全面，制作T形接头对比熔深情况，熔深结果如图6所示。由图6可见，金属粉芯焊丝焊接的焊道熔深较宽，熔透性较好，不易形成未熔合等不良现象。相反，实心焊丝会形成指状熔

深，容易因焊接角度关系而出现熔透及未熔合等不良现象。

进一步对金属粉芯焊丝、实心焊丝及普通药芯焊丝从操作性、焊接性和熔敷效率3个维度进行全面的对比分析，结果见表2。



a) 金属粉芯焊丝 b) 实心焊丝

图6 熔深结果对比 (50×)

表2 3种焊丝操作性、焊接性和熔敷效率对比分析结果

比较项目		普通药芯焊丝	金属粉芯焊丝	实心焊丝
操作性	焊道外观	美观	普通	不佳
	焊道形状	平坦	普通	稍差
	电弧稳定性	良好	良好	稍差
	熔滴过渡	喷射过渡	喷射过渡	粒状过渡
	飞溅发生量	小颗粒、极少	小颗粒、极少	大颗粒多
	熔渣覆盖性	良好	极少	极少
	烟尘发生量	较多	普通	普通
焊接性	冲击吸收能量	普通	良好	良好
	氧含量/ppm	450~900	500~700	500~700
	扩散氢/ (mL/100g)	2~10	1~3	极低
	抗裂性	普通	优秀	优秀
	底漆钢板抗气孔性	很弱	良好	良好
熔敷效率	熔敷效率 (%)	70~90	90~95	90~95
	熔敷速度 (同焊接电流)	大	最大	中

注：1ppm=10⁻⁶。

2.3 总结分析

通过数据对比,可以看出金属粉芯焊丝具有如下的优势。

1) 金属粉芯焊丝具有更高的电流密度,在相同尺寸的焊道要求下,同尺寸的焊丝,可以承载更高的熔覆速度。

2) 兼具药芯焊丝和实心焊丝的优点,具有极少的飞溅与焊渣,不需要清渣,电弧柔软、焊接工艺性好,可以节省焊后修磨处理工时和成本。

3) 金属粉芯焊丝熔透较宽,可以消除侧壁未熔合缺陷,具有较宽的电子发射区域,形成的熔池更稳定,也具有较佳的焊道形状,可减少熔合不良与夹渣现象,提高焊接合格率。

4) 在焊接参数方面具有比实心焊丝更大的焊接电流、焊接速度,熔敷率高,可提升生产效率30%以上。

5) 极低的扩散氢含量,抗锈、抗气孔能力强等,因此,结合以往新焊接材料开发经验,对金属粉芯焊丝进行了深入的研究分析,优选出性能更佳且具备一定价格优势的备用焊接材料,进行推土机方盒类构件的焊接工艺开发^[8],未来可在工件样机上进行小批量试验。

3 样件批量验证

长方盒类构件的生产工艺流程较简单、统一,一般为工装组对→焊合→修磨补焊→校形→(涂装),焊合工序采取双工位双丝自动焊设备,如图7所示。该系统为我公司针对长方盒类构件双直长焊缝专门设计的非标柔性化设备^[9],适用于气体保护电弧焊接方法,焊丝规格为 $\phi 1.6\text{mm}$,焊接摆幅为0~30mm。系统由2套弧焊机器人ARCMAN-MP、2台焊接电源SENSARC-UC500、2套单轴移动装置及

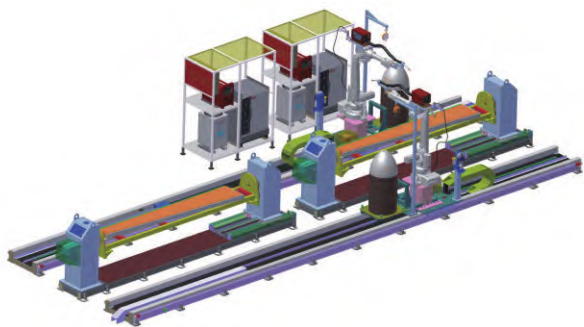


图7 双工位焊接机器人示意

2台双夹持单轴头尾式变位机组成。

试验中选取大截面的SD32方盒进行批量试验,焊接电流由原来的420A调整至480A;打底焊速度不变,盖面焊接速度调整为35~42cm/min,共计进行了50台套的跟踪试验。通过试验,工件整体焊接质量稳定,经统计熔敷效率提升约29.25%,焊接效率得到显著提升。

从焊丝使用量、气体用量、辅料及清理人工工时等方面进行数据收集与统计分析,单台套产品成本对比如图8所示。由图8可知,由于金属粉芯焊丝单价成本比实心焊丝要高出30%左右,导致整体应用经济性成本相差不大,但金属粉芯焊丝具有熔敷率高、焊缝成形控制好、超低飞溅和焊接烟尘少等优点,同时免于大量的焊后修磨工作,因此可为企业节省大量的人力、物力,熔敷特性优势明显。

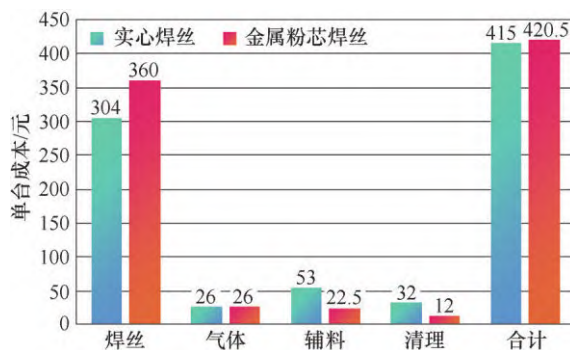


图8 单台套产品成本对比

4 结束语

本项目较好地完成了研究金属粉芯焊丝在某场景的焊接应用,研究结果表明,金属粉芯焊丝兼顾了药芯焊丝和实心焊丝优点,利用金属粉吸收热量,其成分可抑制飞溅,通过了试验验证,同时在焊接力学性能、外观质量、组织等方面具备很好的优点,应用效果明显,由此得出以下结论。

1) 通过工艺研究引入新材料,研究制定大电流金属粉芯焊丝应用的焊接参数标准,改变了常规钎铜实心焊丝的工艺方法。

2) 目前,虽然大电流金属粉芯焊丝综合应用成本略高于实心焊丝,但提升了焊接质量,减少了修磨时间,效率提高了29.25%,已具备应用于实际生产的条件。

3) 金属粉芯焊丝物料采购价格相对较高,但相

(下转第110页)

- of Materials Science, 1987, 22: 1495-1500.
- [18] DURGUTLU A, HASAN O, Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel[J]. Materials & Design, 2008, 29 (7) : 1480-1484.
- [19] MENDES R, RIBEIRO J B, LOUREIRO A. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration[J]. Materials & Design, 2013, 51: 182-192.
- [20] ATHAR, HOSEINI M M, TOLAMINEJAD B. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding[J]. Materials & Design, 2015, 86 : 516-525.
- [21] PAUL H, MISZCZYK M M, CHULIST R, et al. Microstructure and phase constitution in the bonding zone of explosively welded tantalum and stainless steel sheets[J]. Materials & Design, 2018, 153: 177-189.
- [22] CHU Q, MIN Z, LI J, et al. Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 689: 323-331.
- [23] FRONCZEK D M, WOJEWODA-BUDKA J, CHULIST R, et al. Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing[J]. Materials & Design, 2016, 91: 80-89.
- [24] PAUL H, SKUZA W, CHULIST R, et al. The Effect of interface morphology on the electro-mechanical properties of Ti/Cu clad composites produced by explosive welding[J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2020, 51: 750-766.
- [25] 全国钢标准化技术委员会. 复合钢板力学及工艺性能试验方法: GB/T 6396—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [26] 全国钢标准化技术委员会. 金属弯曲力学性能试验方法: YB/T 5349—2014[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- [27] YANG M, MA H, SHEN Z, et al. Study on explosive welding for manufacturing meshing bonding interface of CuCrZr to 316L stainless steel[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 143: 106-114.
- [28] SHAKIL M, TARIQ N H, AHMAD M, et al. Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints[J]. Materials & Design, 2014, 55: 263-273.

MW 20250116

(上接第101页)

信随着技术发展和生产制造对高熔敷、高效率的持续追求,越来越普及的应用,金属粉芯应用成本会进一步降低,未来一定会在工程机械领域具备更好的应用前景。

参考文献:

- [1] 李德明, 韦嘉伟, 杨红刚, 等. 推土机机架方盒焊接变形工艺探讨[J]. 金属加工 (热加工), 2014 (22) : 48-49.
- [2] 刘奔, 徐勤官, 王先锋. 金属粉芯型药芯焊丝开发与应用现状[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (3) : 28-29.
- [3] 张剑利, 吕志军, 田雷, 等. 金属粉芯焊丝气体保护焊在LNG工程中的应用[J]. 焊接技术, 2023, 52 (11) : 77-80.
- [4] 郑州煤矿机械集团股份有限公司. 金属粉芯焊丝在液压支架结构件立向上焊接的方法: CN202010872209.2[P]. 2023-06-09.
- [5] 栾宗峰, 邸新杰, 利成宁, 等. Al和Mg元素对吉帕级熔敷金属组织和力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43 (12) : 20-26.
- [6] 昆山京群焊材科技有限公司. 一种金属粉芯型焊丝及其应用: CN202311798179.5[P]. 2024-02-23.
- [7] 李德明, 吴月, 孟国强, 等. HD-Pulse超低飞溅焊接技术在工程机械领域的应用研究[J]. 金属加工 (热加工), 2016 (24) : 60-63.
- [8] 苏衍福, 任胜汉, 刘斌, 等. 一种国产金属粉芯焊丝封底焊接工艺开发[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (7) : 56-59.
- [9] 李德明. 工程机械用长方盒类构件焊接工艺研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2018. MW 20241212